

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Боброва Ивана Борисовича** на тему **«Пространственные корреляции в бифотонных и классических полях»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21- лазерная физика

Диссертация И.Б. Боброва посвящена изучению пространственных корреляций полей как классической, так и квантовой природы с использованием методов томографии и формализма разложения Шмидта. Задачи томографии имеют важное фундаментальное и прикладное значение. С фундаментальной точки зрения квантовые измерения и квантовая томография дают надежный инструмент для анализа таких базовых понятий квантовой теории как принципиально статистический характер ее предсказаний, принцип суперпозиции, принцип дополнительности Н. Бора и др. С прагматичной точки зрения квантовые измерения являются фактически единственным средством для контроля квантовых состояний и процессов при разработке технологий квантовой информации и квантовых вычислений. Актуальность темы диссертационной работы обусловлена также перспективами использования квантовых систем высокой размерности для задач квантовых вычислений и передачи информации.

Тематика разложения Шмидта, затрагиваемая в первых главах диссертации, развивается уже на протяжении многих лет, но до сих пор не утратила своей актуальности. Основным преимуществом работы в шмидтовском базисе является возможность выделения попарно-коррелирующих мод. Заметим, что в рассматриваемой работе, в основном, исследуются пространственные поперечные моды, которые могут использоваться в задачах квантовой связи и квантовых вычислений. Помимо исследования структуры пространственных мод для источников квантовой и классической природы в диссертации также экспериментально исследуется квантовая интерференция для различных бифотонных состояний. Полученные результаты могут быть актуальны в задачах квантовой литографии, а также при построении квантовых сенсоров высокого разрешения.

Диссертационная работа представляет собой законченное исследование, в котором развиты методики по томографии поперечных пространственных распределений квантовых и классических полей.

Диссертация состоит из Введения, четырех оригинальных глав, Заключения и Списка цитированной литературы. Работа содержит 110 страниц, из которых 97 страниц занимает текст диссертации без списка литературы, обзор литературы выполнен внутри глав, список литературы содержит 93 наименования.

Во **введении** отмечены актуальность работы, научная новизна исследований, практическая значимость, описан личный вклад автора и представлены защищаемые положения.

В **первой главе** диссертации проводится экспериментальное и теоретическое исследование разложения Шмидта для углового спектра спонтанного параметрического рассеяния. В главе делаются определенные предположения, касающиеся пространственной структуры исследуемой амплитуды бифотонного поля. В рамках сделанных предположений собственные моды Шмидта углового спектра бифотонного поля совпадают с хорошо известными пространственными поперечными модами электромагнитного поля, распространяющегося в свободном пространстве. Анализ углового спектра производится в базисе поперечных пространственных мод Эрмита-Гаусса, которые изучаются в рамках сравнительно простой экспериментальной процедуры детектирования, базирующейся на использовании фазовых голографических масок. В этой главе также предлагается метод «самокалибрующейся» томографии, сочетающей в себе процедуры квантовой томографии состояний и квантовой томографии процессов. С помощью метода «самокалибрующейся» томографии восстанавливаются собственные значения в разложении Шмидта и производится оценка систематических погрешностей проекционных измерений.

Во **второй главе** исследуется разложение по пространственным поперечным модам, возникающее в угловом спектре квазитеплого источника излучения. Анализ пространственного спектра осуществляется при помощи метода фазовых голографических масок, осуществляющих проекционные измерения в базисе пространственных мод Эрмита-Гаусса, как и в первой главе. В этой главе экспериментально и теоретически демонстрируется качественное сходство в поведении корреляционной функции второго порядка по интенсивности $g^{(2)}$ с разложением Шмидта для амплитуды бифотонного поля, исследуемым в первой главе. Производится аналитический расчет и проводится численное моделирование корреляционной функции второго порядка $g^{(2)}$ с учетом основных оптических элементов экспериментальной установки.

В **третьей главе** производится томография детектора поперечных пространственных мод. Для построения аналитической модели для отклика детектора применяется формализм POVM (positive operator-valued measure). Отклик детектора исследуется в базисе поперечных мод Эрмита-Гаусса. Автором предложен оригинальный метод, в котором на вход детектора подаются пространственно-распределенные состояния, которые представлены в базисе, отличном от базиса мод детектирования Эрмита-Гаусса. Предложенный подход позволяет избежать экспериментальных ошибок, связанных с приготовлением пространственных состояний в базисе мод Эрмита-Гаусса на входе детектора. Для проверки адекватности предлагаемой томографической процедуры в рассматриваемой главе проводится численное моделирование для детектора пространственных мод. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с проведенным экспериментом.

В **четвертой главе** изучаются двухфотонные интерференционные зависимости, возникающие при использовании бифотонных состояний на входе

интерферометра Юнга с двумя источниками. Проводится аналитический расчет пространственного распределения амплитуды бифотонной волновой функции для схемы Юнга. Посредством расчетов и экспериментов демонстрируется двукратное уменьшение периода квантовых интерференционных распределений по сравнению с периодом классической интерференции, при освещении интерферометра Юнга монохроматическим светом с такой же длиной волны. В этой главе также демонстрируется устойчивость квантовой интерференционной картины, полученной при использовании входного сепарабельного состояния $|1,1\rangle$ для случая добавления дополнительной фазовой задержки к одному из источников в интерферометре Юнга.

В качестве **основных результатов** диссертации можно отметить следующие:

В работе впервые исследованы пространственные корреляции между поперечными модами для углового спектра бифотонного и квазитеплого поля в базисе мод Эрмита-Гаусса. Для анализа исследуемого разложения Шмидта впервые был применен подход «самокалибрующейся» томографии.

В диссертации предложен и опробован оригинальный метод для калибровки детектора пространственных мод.

Впервые продемонстрирована устойчивость квантовой интерференционной картины, возникающей при использовании сепарабельных состояний $|1,1\rangle$ на входе интерферометра Юнга с двумя источниками по отношению к фазовой задержке, вносимой только в один из источников интерферометра.

Замечания по диссертации:

1. Формула на странице 11 автореферата для амплитуды бифотонного поля содержит ошибку. Диссертантом рассматривается сумма, которая содержит только K слагаемых, где K - это число Шмидта, определяемое формулой (1.8) диссертации. Между тем, суммирование должно происходить по всем модам, веса которых имеют ненулевые значения, что, как правило, приводит к бесконечным рядам. Для решения конкретных задач с точностью, необходимой для практических нужд, обычно требуется учитывать весьма большое число мод, многократно превышающее число Шмидта K . Считаю эту ошибку технической.
2. Аппроксимация точного выражения (1.4) для амплитуды бифотонного поля посредством гауссовой функции (1.11) содержит в себе существенную неточность. Более точное численное рассмотрение многомерного разложения Шмидта позволило бы, на наш взгляд, существенно улучшить расчет соответствующей фазовой маски, что привело бы к более точным экспериментальным результатам.
3. В формуле (3.5) для POVM-элементов коэффициенты $\theta_{k,p}^{(n)}$ должны быть таковы, чтобы операторы измерений $\tilde{\pi}_n$ были положительно определенными

и обеспечивали разложение единицы. Между тем, эти условия никак не оговариваются и не обсуждаются в тексте диссертации.

Представленные замечания не умаляют несомненных достоинств работы.

Заключение по диссертационной работе:

Текст автореферата соответствует основному содержанию диссертации.

Полученные в работе результаты достоверны, заключения и выводы хорошо обоснованы. Работа основана на большом объеме экспериментальных данных. Имеется подробный анализ экспериментальных результатов, базирующийся на теоретических расчетах, в том числе и с применением численного компьютерного моделирования.

13 апреля 2017 г. работа была заслушана и одобрена на семинаре по физике квантовых компьютеров в Физико-технологическом институте РАН.

Диссертационная работа «Пространственные корреляции в бифотонных и классических полях» полностью соответствует критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Бобров Иван Борисович, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник
Физико-технологического института РАН,
доктор физ.-мат. наук

Ю.И. Богданов

Ученый секретарь
Физико-технологического института РАН



В.А. Кальнов